

ΒΑΡΥΤΙΚΕΣ ΔΙΕΡΓΑΣΙΕΣ ΜΕΤΑΦΟΡΑΣ ΙΖΗΜΑΤΩΝ ΚΑΙ ΑΝΑΛΥΣΗ ΕΥΣΤΑΘΕΙΑΣ ΠΡΑΝΩΝ ΣΤΗ ΛΕΚΑΝΗ ΤΟΥ ΣΤΕΝΟΥ ΤΗΣ ΖΑΚΥΝΘΟΥ

Χασιώτης Θ., Παπαθεοδώρου Γ. και Φερεντίνος Γ.

Εργαστήριο Θαλάσσιας Γεωλογίας & Φυσικής Ωκεανογραφίας, Τμήμα Γεωλογίας, Παν/μιο Πατρών.

ABSTRACT

Hasiotis, T., Papatheodorou, G. and Ferentinos, G: Mass transport processes and slope stability analysis in the Zakynthos basin, Zakynthos straits.

This paper presents preliminary results of a marine survey conducted between W. Peloponnesos (Killini) and Zakynthos island. The gravitational sedimentation processes (sliding, slumping, mass flows, turbidity currents) that take place in the region are mainly caused by earthquake shaking and are enhanced by salt diapirism. Slope stability analysis under undrained conditions confirm the instability processes observed in the seismic records.

ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Το στενό της Ζακύνθου βρίσκεται στο δυτικό τμήμα της Ελληνικής Τάφρου μεταξύ της δυτικής Πελοποννήσου (χερσόνησος Κυλλήνης) και της Ζακύνθου και αποτελεί την κορυφή ενός συστήματος κοιλάδας/χαράδρωσης ΒΔ-ΝΑ διεύθυνσης, η οποία εκτείνεται προς νότο μέχρι βάθους 2000μ. Η περιοχή χαρακτηρίζεται από έντονη σεισμικότητα η οποία σχετίζεται με τη σύγκρουση και καταβύθιση τεκτονικών πλακών κατά μήκος της Ελληνικής Τάφρου (Parazachos, 1976). Οι Νεογενείς και Τεταρτογενείς αποθέσεις στη χέρσο που περιβάλλει την υπό μελέτη περιοχή, χαρακτηρίζονται από νεοτεκτονική παραμόρφωση η οποία προκαλείται από την άνοδο αλατούχων διαπύρων. Η νεοτεκτονική παραμόρφωση έχει εντοπιστεί στη χερσόνησο της Κυλλήνης και στο ΝΑ τμήμα της Ζακύνθου. Βαθεία σεισμικά ανάκλαση (multichannel) καθώς και ερευνητικές γεωτρήσεις σε προηγούμενες θαλάσσιες γεωλογικές έρευνες απέδειξαν την παρουσία αλατούχων δόμων γύρω από την περιοχή έρευνας καθώς και επιφανειακές εμφανίσεις αυτών στην παρακείμενη χέρσο (Brooks and Ferentinos, 1984).

ΜΕΘΟΔΟΙ ΕΡΕΥΝΑΣ

Τα στοιχεία που παρουσιάζονται στη μελέτη αυτή συλλέχθηκαν τον Ιούνιο του 1994 κατά τη διάρκεια μίας θαλάσσιας γεωφυσικής/γεωτεχνικής έρευνας για την επιλογή της ασφαλέστερης οδού πόντισης ενεργειακών καλωδίων υψηλής τάσης (Ferentinos et al, 1994). Η γεωφυσική έρευνα εκτελέστηκε με ένα βυθόμετρο 200kHz JVC, ένα τομογράφο υποδομής πυθμένα 3.5kHz GEOPULSE, ένα τομογράφο 2000J SIG τύπου Sparke και ένα ηχοβολιστή πλευρικής σάρωσης τύπου E.G.&G. Ένας πυρηνολήπτης βαρύτητας 3μ τύπου BENTHOS χρησιμοποιήθηκε για τη συλλογή πυρήνων ιζημάτων με σκοπό τη μελέτη της κατακόρυφης κατανομής των γεωτεχνικών ιδιοτήτων των ιζημάτων. Για τον προσδιορισμό της θέσης του σκάφους χρησιμοποιήθηκε ένα GPS τύπου MAGNAVOX MX200 ακριβείας 50μ.

ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ - ΣΥΖΗΤΗΣΗ

Η υπό μελέτη περιοχή στο στενό της Ζακύνθου μπορεί να διακριθεί σε πέντε μορφολογικές ενότητες: στην κρηπίδα και κατοφέρεια της Κυλλήνης, στη λεκάνη Κυλλήνης-Ζακύνθου και στην κρηπίδα και κατοφέρεια της Ζακύνθου (Εικ. 1α, β).

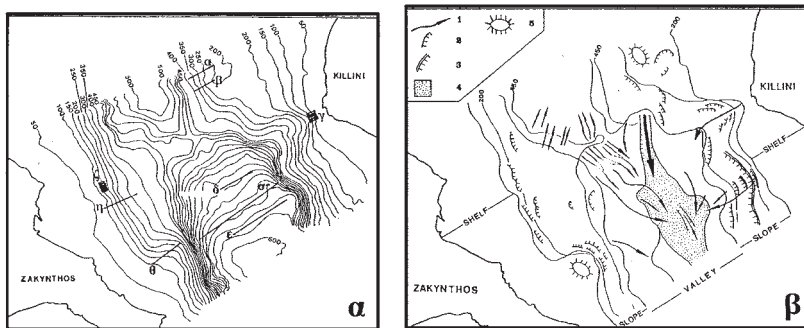
Η εξέταση των τομογραμίων 3.5kHz και Sparke στην κρηπίδα της Κυλλήνης έδειξαν την παρουσία ενός μετώπου κατολίθωσης, αμφιθεατρικού σχήματος, ύψους 40μ και εύρους 800μ, το οποίο αναπτύσσεται πάνω σε μία θαμμένη απόθεση βαρυτικής ροής. Το αποκολληθέν τεμάχος συμπεριέλαβε τα πρόσφατα καλώς ενστρωμένα ιζήματα αλλά και ένα μεγάλο μέρος της θαμμένης βαρυτικής απόθεσης. Το μέτωπο είναι ασταθές και αποσυντίθεται προς τα ανάπτι με ένα ανάδρομο μηχανισμό ενώ το επίπεδο της κατολίθωσης καλύπτεται με μικρού αναγλύφου βαρυτικές ροές. Οι ρηγματωμένοι επιφανειακοί σεισμικοί ανακλαστήρες ανάπτι και γύρω από το μέτωπο, δηλώνουν την ανάπτυξη περιφερειακών θραύσεων στέψης.

Στην περιοχή του υφαλογείου της βόρειας Κυλλήνης οι σεισμικοί ανακλαστήρες παρουσιάζονται αναβολωμένοι, έχοντας μία ανικλινηκή μορφή ενώ επιπλέον είναι ρηγματωμένοι, στοιχείο που δηλώνει την ύπαρξη ενός υποκείμενου αλατούχου διάπυρου (Εικ. 2α). Η ανοδική κίνηση του δόμου έχει ως αποτέλεσμα την αύξηση των κλίσεων του πυθμένα και συνεπώς τη δημιουργία ευνοϊκού περιβάλλοντος στην κατοφέρεια για ανάπτυξη βαρυτικών μετακινήσεων ιζημάτων. Τα καλώς ενστρωμένα ιζήματα της πλαγιάς έχουν ολισθήσει με τη μορφή περιστρεφόμενων τεμαχίων τα οποία προς τα

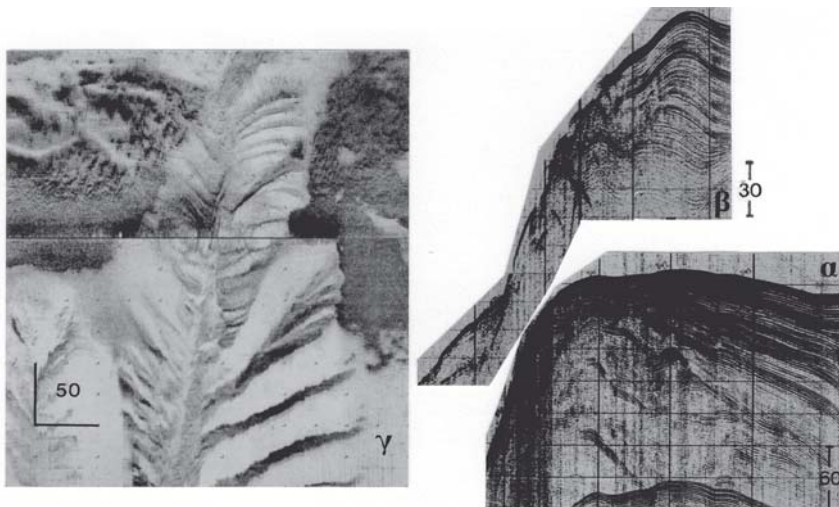
κατάντι αποσυντίθενται πλήρως σχηματίζοντας αποθέσεις βαρυτικών ροών (Εικ. 2β). Τα κατολισθθέντα συνεκτικά τεμάχια ιζημάτων έχουν στραφεί προς τα ανάντι δίνοντας μία κλιμακωτή μορφολογία στον πυθμένα. Το επίπεδο ολίσθησης βρίσκεται περίπου 45μ κάτω από τον πυθμένα στην περιοχή του υφαλορρίου, παρουσιάζει έντονη ανακλαστικότητα και αποτελεί πιθανώς μία τουρβιδιτική απόθεση. Οι ρηγματώσεις πάνω από την κεφαλή της κατολίσθησης και η απουσία ολισθθέντων τεμαχίων προς τα κατάντι τα οποία θα μπορούσαν να αποτελέσουν στήριγμα των προς τα ανάντι ιζημάτων της πλαγιάς, αποτελούν ενδείξεις του ανάδρομου μηχανισμού ανάπτυξης της κατολίσθησης.

Το κεντρικό τμήμα της κρηπίδας/πλαγιάς της Κυλλήνης διατέμνεται από μία υποθαλάσσια χαράδρωση Α-Δ διεύθυνσης, η οποία μάλλον αποτελεί συνέχεια ενός μικρού χειμάρρου στη χέρσο. Το βόρειο τοίχωμα της χαράδρωσης είναι πιο απότομο σε σχέση με το νότιο και τα δύο όμως διασχίζονται από αυλάκια τα οποία αποτελούν ένα πυκνό σύστημα τροφοδοσίας όπως διαπιστώνεται και από το ακουστικό μοντέλο που παρουσιάζουν στις ηχογραφίες (Εικ. 2γ). Η κοίτη της χαράδρωσης παρουσιάζει ιδιαίτερα τραχειά μορφολογία στα ρηγά ενώ βαθύτερα γίνεται σταδιακά ομαλή. Η τραχειά μορφολογία σχετίζεται με τα πολυάριθμα αυλάκια αλλά και με τις εκτεταμένες ολισθήσεις των τοιχωμάτων της χαράδρωσης.

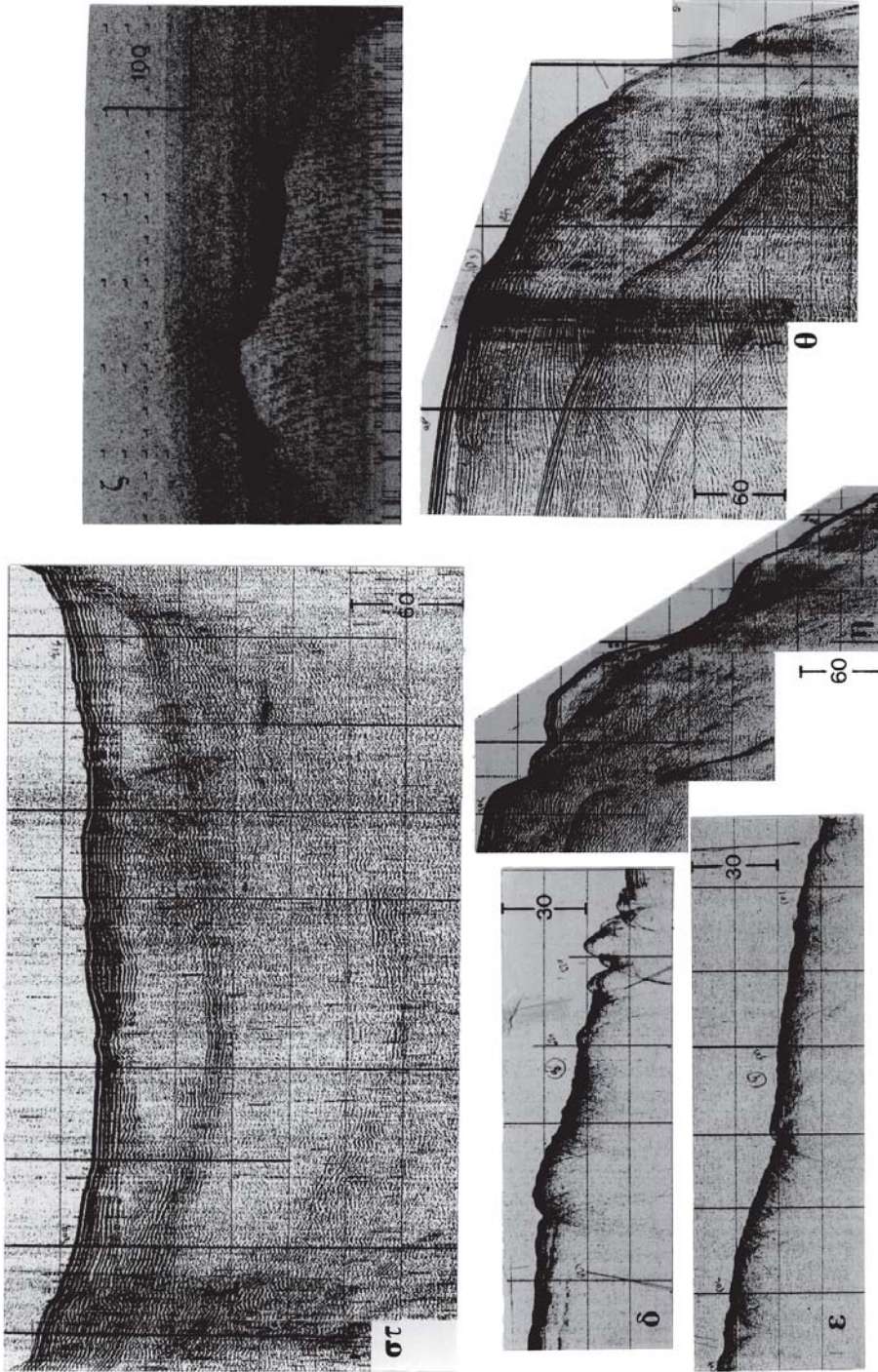
Η κατοφέρεια της νότιας Κυλλήνης αν και είναι πιο απότομη (18%) σε σχέση με τη βόρεια (11%) είναι πιο ομαλή και μόνο τοπικά επηρεάζεται από περιστροφικές ολισθήσεις. Εκτεταμένα μέτωπα κατολίσθησεων ή/και αποκολληθέντα



Εικ. 1: (α) Βυθομετρικός χάρτης στον οποίο παρουσιάζονται οι θέσεις των τομογραφιών και ηχογραφιών και (β) μορφολογικός χάρτης του πυθμένα. 1: κανάλια, 2: μέτωπα κατολίσθησεων, 3: θαμμένα μέτωπα κατολίσθησεων, 4: περιοχή διάβρωσης/απόθεσης, 5: αλατούχοι δόμοι.



Εικ. 2: Τομογραφίες Sparker (α,β) και ηχογραφία (γ) από την υπό μελέτη περιοχή (λεπτομέρειες στο κείμενο) (συνεχίζεται).



Εικ. 2 (συνέχεια): Τομογραφίες 3.5kHz (δ,ε) και Sparker (στ,η,θ) από την υπό μελέτη περιοχή (λεπτομέρειες στο κείμενο), ζ

τεμάχια ιζημάτων δεν διαπιστώθηκαν στις σεισμικές καταγραφές. Η παρουσία όμως θαμμένων μετώπων μεγάλου εύρους, πάνω σε ευδιάκριτα επίπεδα μετακίνησης, 5-6μ κάτω από τον πυθμένα δηλώνει τη δράση μεγάλων κατολισθητικών φαινομένων στο παρελθόν.

Ο πυθμένας της λεκάνης μεταξύ Κυλλήνης και Ζακύνθου χαρακτηρίζεται από μορφολογία μικρού αναγλύφου που σχετίζεται με κανάλια ή λοφοειδείς σχηματισμούς λόγω βαρυτικών διεργασιών. Το κεντρικό τμήμα της λεκάνης παρουσιάζει τραχεία μορφολογία η οποία είναι αποτέλεσμα διεργασιών διάβρωσης/απόθεσης από βαρυτικές ροές ιζημάτων και τουρβιδιτικά ρεύματα (Εικ. 2δ,ε). Το κύριο κανάλι τροφοδοσίας της περιοχής αυτής ξεκινά από την ασταθή πλαγιά της βόρειας Κυλλήνης, έχει διεύθυνση περίπου Β-Ν και παρουσιάζει καλά αναπτυσσόμενα περιθώρια και τοπικά αποθέσεις υπερχείλισης. Πολλά μικρότερα κανάλια τα οποία διασχίζουν την κατοφέρεια της Ζακύνθου και το βόρειο τμήμα της λεκάνης φαίνεται να απολήγουν στην προαναφερθείσα περιοχή. Σεντονοειδούς μορφής αποθέσεις βαρυτικών ροών καθώς και τα κανάλια τροφοδοσίας τους εντοπίστηκαν επίσης στην περιοχή της λεκάνης. Η υποδομή της λεκάνης συνίσταται από εκτεταμένες βαρυτικές αποθέσεις που προέρχονται από τις κατοφέρειες της Κυλλήνης και της Ζακύνθου και από το βόρειο τμήμα της υπό μελέτη περιοχής και διαχωρίζονται μεταξύ τους από καλώς ενστρωμένα ιζήματα δηλώνοντας περιόδους κανονικής (ημιπελαγικής) ιζηματογένεσης ή/και αποθέσεις μεγάλων τουρβιδιτικών γεγονότων (Εικ. 2στ).

Η κατοφέρεια της Ζακύνθου έχει κλίση που κυμαίνεται μεταξύ 15 και 20% ενώ το νότιο τμήμα της είναι πολύ απότομο (έως 34%) και τοπικά υπερβαίνει το 40%. Στο κεντρικό τμήμα της κατοφέρειας η κλίση σταδιακά ελαττώνεται προς τα κατάντι σχηματίζοντας μία ευρεία “βάση πλαγιάς” με κλίσεις μικρότερες του 6%. Η κατοφέρεια γενικώς καλύπτεται από χαλαρά καλώς ενστρωμένα ιζήματα τα οποία υπέρκεινται θαμμένων βαρυτικών αποθέσεων. Εκτεταμένες βαρυτικές μετακινήσεις μαζών διαπιστώθηκαν στις ηχογραφήσεις (Εικ. 2ζ) και στις τομογραφίες (Εικ 2η). Οι σεισμικές καταγραφές απέδειξαν επίσης περιοχές αποκόλλησης ιζημάτων ακόμη και στη, μικρής κλίσης, βάση της πλαγιάς καθώς και κανάλια τα οποία εκκινούν από περιοχές αστάθειας του πυθμένα στην ανώτερη πλαγιά. Η απότομη κλίση της κατοφέρειας στη νότια Ζάκυνθο σχετίζεται άμεσα με τη διαπυρική διείσδυση ενός αλατούχου δόμου που αποτελεί την προς ανατολάς συνέχεια επιφανειακών εμφανίσεων εβαποριτών στη χέρσο. Η απότομη αύξηση της κλίσης λόγω της διαπυρικής διείσδυσης έχει ως αποτέλεσμα τη μείωση της αντοχής του ιζηματογενούς καλύμματος, η οποία εκφράζεται με ολισθήσεις (Εικ. 2θ) και μέτωπα κατολισθήσεων ύψους έως 30μ.

Η ευστάθεια των επιφανειακών ιζημάτων στην κατοφέρεια της Κυλλήνης και της Ζακύνθου υπολογίστηκε με τη μέθοδο του “μη πεπερασμένου προανού” υπό αστράγγιστες συνθήκες κάτω από στατική όσο και δυναμική φόρτιση που στην υπό μελέτη περιοχή εκφράζεται μέσω της σεισμικής δραστηριότητας. Η τιμή του συντελεστή ασφάλειας (F) που υπολογίστηκε δηλώνει την ευστάθεια ($F > 1$) ή όχι ($F < 1$) των κατοφερειών. Η ανάλυση εφαρμόστηκε χωριστά για τη βόρεια και νότια κατοφέρεια της Κυλλήνης και για αυτή της Ζακύνθου, για όλο το εύρος των κλίσεων που παρατηρήθηκαν και για όλα τα βάθη των πιθανών επιφανειών αστάθειας που αναγνωρίστηκαν στις τομογραφίες και στους πυρήνες ιζημάτων που συλλέχθηκαν από την περιοχή.

Η βόρεια και νότια κατοφέρεια της Κυλλήνης κάτω από αστράγγιστες στατικές συνθήκες είναι σταθερές ($F_s > 1$) εκτός από μία επιφανειακή πιθανή επιφάνεια αστάθειας στα 0.4μ όπου $F_s < 1$. Στο βάθος αυτό διαπιστώθηκε στους πυρήνες, η παρουσία ενός σχεδόν ηλίουχου οριζοντα πολύ μικρής διαμητρικής αντοχής που έχει ως αποτέλεσμα τη μείωση της τιμής του λόγου S/Po. Η κατοφέρεια της Ζακύνθου είναι ευσταθής σε βαθύτερες πιθανές επιφάνειες αστάθειας και ασταθής στις επιφάνειες των 0.4μ και 1.7μ όπου $F_s < 1$.

Κάτω από δυναμική φόρτιση και σε αστράγγιστες συνθήκες η βόρεια και νότια κατοφέρεια της Κυλλήνης είναι ασταθής με πολύ μικρή τιμή F_D για τα πιθανά επίπεδα ολίσθησης των 0.4μ και 1.2μ. Παρομοίως, η κατοφέρεια της Ζακύνθου είναι ασταθής με πολύ μικρές τιμές F_D για βάθη 0.4μ και 1.7μ. Σε κλίσεις πυθμένα μικρότερες από 8° και για μεγαλύτερα βάθη πιθανών επιφανειών αστάθειας (έως 15μ) η κατοφέρεια βρίσκεται σε ευσταθείς συνθήκες ($F_D > 1$). Σε όλες τις προαναφερθείσες περιπτώσεις, σε δυναμικές συνθήκες, η μέγιστη εδαφική επιτάχυνση η οποία είναι ικανή να προκαλέσει αστάθεια του πυθμένα έχει τιμή μικρότερη από την αναμενόμενη σεισμική επιτάχυνση (16-18%) για την περιοχή.

BIBLIOGRAPHY

- Brooks, M. and Ferentinos, G. (1984): Tectonics and sedimentation in the Gulf of Corinth and Kefhalonia- Zante straits, Ionian sea, Greece. *Tectonophysics*, 101, 25-54.
- Ferentinos, G., Papaetheodorou, G., Hasiotis, T. and Geraga, M. (1994): Marine geophysical/geotechnical survey between Killini and Zakynthos island for the laying of submarine power cables. Preliminary report submitted to the Public Power Corporation of Greece.
- Papazachos, B. (1976): Seismic activity along the Saronicos-Corinth-Patras Gulfs. *Mon. Bull. Natl. Seism. Obs.*, 35-42, Athens.